



SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO EN LA CIUDAD BUENA FE, ECUADOR APLICANDO EL AUTÓMATA CELULAR SLEUTH

SIMULATION OF URBAN GROWTH IN THE CITY OF BUENA FE, ECUADOR APPLYING THE SLEUTH CELLULAR AUTOMATON

Centro Sur.
Social Science Journal
2022 – Número continuo
<http://centrosureditorial.com/index.php/revista>
eISSN: 2600-5743
revistacentrosur@gmail.com

Atribución/Reconocimiento-
NoComercial-CompartirIgual 4.0
Licencia Pública Internacional —
CC BY-NC-SA 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.es>

Echeverría Carmigniani Cristhian Joel
Carrillo Maldonado Lady Estefania
Vlassova Lidia

Resumen

Los modelos Autómatas Celulares (AC), permiten prever las consecuencias de las políticas de planificación territorial que buscan la sostenibilidad. El objetivo del proyecto fue aplicar el software libre de AC SLEUTH de NASA para generar escenarios predictivos del crecimiento urbano de la ciudad Buena Fe, Ecuador. Se utilizaron las imágenes de los satélites Landsat-5 y 8, y Sentinel-2, modelo digital de terreno de NASA, y mapas en formatos vectorial del Sistema Nacional de Información. En el pre-procesamiento en ambiente SIG los datos fueron reproyectados a UTM zona 17S, datum WGS84 y se generaron las capas en formato GIF. La calibración utilizó las áreas urbanas extraídas de las imágenes satélites Landsat-5 (1984, 2000), Landsat-8 (2013) y Sentinel 2 (2019), usando método de clasificación de máxima similitud (coeficiente Kappa ~0.8). Se validó el modelo generado con la imagen real observada del año 2019 (Sentinel-2) mostrando buen ajuste

(coeficiente Kappa 0,84) y fue utilizado para predicción. Entre 1984 y 2019 el área urbana de Buena Fe creció más de 4 veces, que es similar al ritmo del crecimiento poblacional. El escenario futuro para el 2040 en el caso de

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-6942-0789>, cristhian.echeverria2016@uteq.edu.ec

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-1290-8513>, lady.carrillo@uteq.edu.ec

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0001-5025-5691>, llassova@uteq.edu.ec

seguir la tendencia actual resulta en el crecimiento de más de 200% de la extensión urbana a costa de tierras agrícolas llegando aproximadamente 20 kilómetros cuadrados. Se predice el crecimiento principalmente al norte del área actual, siendo acceso a las vías principales y el relieve los factores determinantes del patrón espacial.

Palabras Clave: Autómata Celular, Crecimiento Urbano, Escenarios Predictivos, Modelo SLEUTH, Planificación Territorial.

Abstract

Cellular Automata (CA) models make it possible to foresee the consequences of land planning policies seeking sustainability. The objective of this research project was to apply free software implementing CA model SLEUTH developed by NASA to predict urban growth scenarios for the Buena Fe area in Ecuador. Input data were derived from Landsat and Sentinel-2 satellite images, digital elevation model generated by NASA and vector maps of the study area from National Information System of Ecuador. During pre-processing in the GIS environment all the data were

reprojected to the UTM projection (Zone 17S), WGS84 datum followed by the transformation of all the layers into the required GIF file format. The calibration used urban areas extracted from the satellite images acquired in 1984, 2000 (Landsat-5), 2013 (Landsat-8) and 2019 (Sentinel-2) with the Maximum Likelihood method (Kappa coefficient ~0,8). It was validated with Sentinel-2 image taken in 2019 showing good fit (Kappa coefficient 0.84). During 1984-2019 period the urban areas in Buena Fe grew more than 4 times, which is similar to the population growth. Considering these rates, the future growth scenario for 2040 is expected to achieve the extension of 20 km², the increment of more than 200% in the extension of the urban areas which will spread over the agricultural lands. Most of the expected growth is predicted to the north of the existing city, being the Access to the transportation network and the topography the factors determining the urban spatial patterns.

Key words: Cellular Automaton, Urban growth, Predictive Scenarios, SLEUTH Model, Territorial Planning.

Introducción

El crecimiento urbano a nivel global ha generado cambios intensos en los usos del suelo y áreas ocupadas por cada uno de ellos (Xu et al., 2016). Durante los últimos años los modelos de simulación del crecimiento urbano han incrementado su uso para modelar el desarrollo y expansión urbana (Li et al., 2021), y uno de los ejemplos de estos modelos son los modelos de Autómatas Celulares, se encuentra el modelo SLEUTH (Pendiente, Cobertura Terrestre, Exclusiones, Áreas Urbanas, Transporte, Hidrológico), que se utilizan para la evaluación y predicción del crecimiento urbano (Jat et al., 2017a).

El uso de algoritmos de desarrollo y predicción urbana junto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite entender de mejor manera los

procesos de expansión poblacional y se convierte en un apoyo a las autoridades locales para lograr optimizar la organización del espacio físico urbano, además, de planificar el desarrollo de las ciudades, para evitar problemas mundialmente comunes como crecimiento descontrolado, inseguridad alimentaria, pérdida de la biodiversidad y contaminación ambiental.

En Ecuador, el crecimiento urbano ha sido descontrolado, resultando en un quebrantamiento social y territorial, en respuesta a esto, algunos municipios han iniciado procesos de recuperación de áreas verdes, pero estos esfuerzos han sido aislados, pues se evidencia la necesidad de generar marcos de regulación, control nacional y planificación territorial (MIDUVI, 2015). A nivel nacional, estos estudios de simulación y proyección urbano no deben ser la excepción, y la cabecera cantonal de Buena Fe (con una extensión de 581,2281 km²), perteneciente a la provincia de Los Ríos, merece ser examinada (León, 2016), puesto que es una ciudad de rápido progreso y desarrollo gracias a lo productivo de su tierra y el trabajo de la gente. Según los resultados de los censos estadísticos realizados en el 2010, en la ciudad Buena Fe existe una migración interna por parte de la población rural hacia los centros poblados urbanos más cercanos (PDyOT BUENA FE, 2019), arraigando con esto, problemas de urbanización y necesidades básicas insatisfechas, además, atrae consigo complicaciones de demografía, educación, salud y ambiente. Como resultado, consecuencias en el crecimiento poblacional, asentamientos informales no regularizados en el área urbana, escasez de infraestructuras de servicios básicos y actividades antropogénicas perjudiciales para el medio ambiente que no pueden ser mitigados por las autoridades cantonales competentes.

Ante el crecimiento poblacional presente en la zona urbana del cantón Buena fe, este trabajo investigativo tuvo como objetivo desarrollar modelos espaciales predictivos de crecimiento urbano y comparó los escenarios de crecimiento urbano de la ciudad Buena Fe para el periodo 1986-2040 mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas celulares.

Metodología

Área de estudio

El estudio se realizó en el área urbana del cantón Buena fe, ubicada geográficamente en el norte de la provincia Los Ríos, Ecuador (figura 1). Cuenta con una extensión de 581,22 km², y una población total al 2014 de 72.263 habitantes. La zona de estudio presenta clima cálido, tipo húmedo tropical, pertenece a la zona climática denominada tropical monzónica y con una elevación promedio de 101,73 m.s.n.m. Entre sus características geomorfológicas, presenta relieve con sabanas y lomas, una temperatura media anual de 24.4°C y precipitación media anual supera los 2000 mm (PDyOT BUENA FE, 2019).

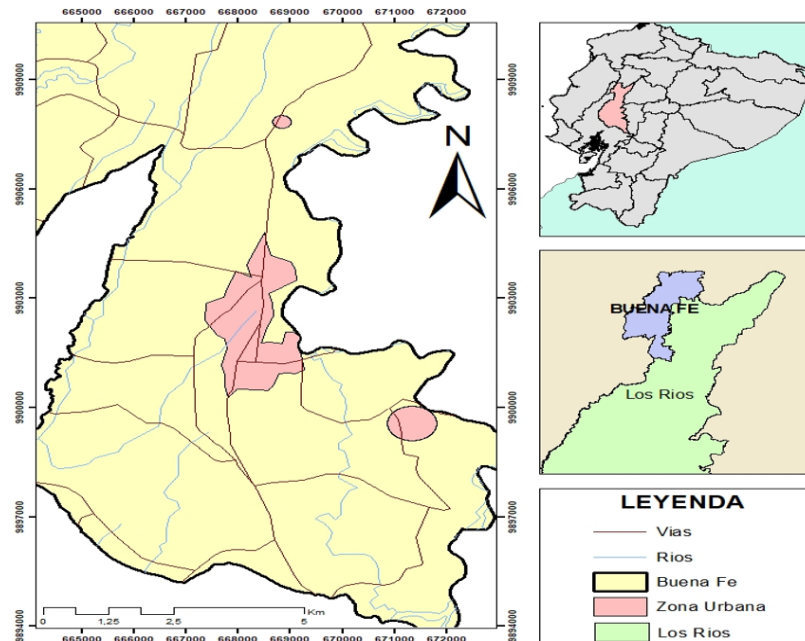


Figura 1. Ubicación de la zona urbana de la ciudad Buena Fe

Datos de entrada

Se recopiló datos necesarios para la proyección del área de estudio hacia el año 2040, entre las cuales contaron pendiente, cobertura terrestre, exclusiones, áreas urbanas, transporte e hillshade (tabla 1). Los datos de pendiente, cobertura terrestre, transporte y hillshade se recopiló de geoportales de libre acceso (al menos dos períodos de tiempo de la capa de transporte), las áreas excluidas se las recopilaron del plan de ordenamiento territorial del cantón Buena Fe, y las áreas urbanas (al menos cuatro períodos de tiempo urbano) se obtuvieron de las imágenes satelitales disponibles en la página EarthExplorer.usgs.gov (Li et al., 2021). La presente investigación tomó los datos de cobertura terrestre solo para datos de entrada, ya que el estudio solo simuló el crecimiento urbano y no estudia los cambio y usos de suelo.

Tabla 1. Detalles de los principales conjuntos de datos de entrada para el modelado SLEUTH

Datos de entrada	Fuente de datos	Resolución	Año	Área
Urbano	Landsat TM 5-8 y Sentinel 2/USGS		1986, 2000,2013,2019	
Transporte	Geoportal IGM		1984, 2013, 2019	
Hillshade	SRTM DEM	30 m	2013	5 km
Pendiente	SRTM DEM		2013	
Área Excluida	PDyOT cantón Buena Fe		2013	
Cobertura terrestre	Geoportal IGM		1982, 2015	

Calibración SLEUTH

Previo a la calibración del modelo SLEUTH, fue necesario recopilar los datos de entrada (tabla 2). Con ayuda del programa Envi 4.7, se dividió las regiones de interés con un mínimo de 40 puntos, se extrajeron las manchas urbanas de las imágenes satelitales mediante clasificación supervisada con el método de máxima verosimilitud con un nivel de probabilidad de 0.85 de exactitud. Para la capa de pendiente, se utilizó un raster digital de elevación del Ecuador “srtm” (Misión Topográfica Shuttle Radar) en formato .tif, con una resolución de 30 metros. Posterior a eso, se recortó el raster para la ciudad Buena Fe en el software Arcmap. La capa de hillshade se generó a partir de la capa de pendiente, con el mismo software geoespacial, con valores de Azimuth = 315 y Altitude = 45.

Mientras que, para la generación de las capas de uso de suelo, se utilizaron las capas de uso del suelo del año 1982 y 2015, puesto que no existían estas capas para los

años en cuestión. En las capas de la red vial, no existe carta topográfica de la ciudad Buena Fe para el año 1986, para lo cual, se digitalizó la carta topográfica compilada del año 1984, elaborada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador. La diferencia de años no representa un sesgo importante en la posterior proyección. Las vías del año 2013 se obtuvieron de la Geodata Empatada Nacional de geoportales nacionales de libre acceso, y las vías del año 2019 se obtuvieron del software geoespacial Qgis3 en formato .shp. Posterior a eso, se transformó todas las vías a formato raster, y finalmente a formato .tif, que es el formato que puede ser modificado.

Se generó dos capas de áreas excluidas, una con áreas urbanizables y la otra sin estas áreas. Las áreas que se tomaron en cuenta fueron: recintos militares, áreas verdes, áreas protegidas, reservas naturales y centros educativos. Esta actividad se ejecutó mediante observación directa de imágenes de Google Earth y el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la ciudad Buena Fe para un momento en el tiempo, en este caso 2019. Finalmente, se verificó que todos los datos obtenidos estuviesen con un área de 5000 m, una resolución espacial de 30 m, sistema de georreferenciación UTM WGS-1984 zona 17 Sur y en formato .gif.

La calibración constó de 3 fases: fase gruesa (se utilizó las imágenes con resolución espacial con 1/4 de su tamaño real y con 100 iteración Monte Carlo), fase fina (se utilizó las imágenes con resolución espacial con 1/2 de su tamaño real y con 100 iteración Monte Carlo), y fase final (se utilizó las imágenes con su real resolución espacial y con 100 iteración Monte Carlo). Se comenzarán con valores de crecimiento de los parámetros de 0 para Start, 25 en Step y 100 en Stop según la metodología aplicada por Patriana & Nurismalatri, (2008).

Tabla 2. Datos de entrada para la calibración de SLEUTH

Datos de entrada	Formato	Rango de valores
Urbano		0 no edificado y 1 a 256 edificado
Transporte		0 no es vía y mayor a 0 es vía
Hillshade	GIF [8 bit escala de grises]	0 a 255, 0 = agua
Pendiente		% de pendiente de 0 a 100
Área Excluida	Misma proyección, extensión y resolución	0 = áreas sin restricción y mayor a 0 áreas sin restricción
Cobertura terrestre		codificación de categorías de 0 a 255

Validación SLEUTH

Para la validación de modelo, se comparó la extensión urbana modelada en el año 2019 contra la observada en el año 2019, con el año 2013 como año semilla. Se obtuvo 13 indicadores que se utilizó para determinar la bondad de precisión del modelo (todos los indicadores poseen un rango de 0.0 a 1.0, siendo 1 el ajuste perfecto) Dietzel & Clarke (2007). El coeficiente Kappa y los métodos de comparación celda por celda se utilizaron para la validación del modelo (Li et al., 2021). El coeficiente kappa nos ayudó a medir el grado o fuerza de la concordancia, y de esta manera, determinar con exactitud la clasificación de las categorías de las imágenes, mientras que, el método celda por celda, implica la coincidencia espacial de píxeles y es una buena técnica de evaluación de la precisión (Torrens, 2011).












Predicción SLEUTH

En la fase de pronóstico, se obtuvo los mapas de áreas urbanizadas de la ciudad Buena Fe hacia el año 2040 con el año 1986 como año semilla. Se generó escenarios de patrón de crecimiento intensivo I (asumiendo el mantenimiento de las tendencias actuales de crecimiento utilizando una capa de restricción, que incorpora áreas que

no pueden ser urbanizables, tales como cuerpos de agua, áreas verdes, áreas protegidas, reservas naturales y demás áreas prohibidas de urbanización) y el patrón de crecimiento intensivo II (escenario que no respeta estas restricciones de urbanización) (Li et al., 2021). La predicción incluyó estadísticas que se utilizó para evaluar y observar el comportamiento dinámico del crecimiento urbano pronosticado, mapas de probabilidad y animaciones del crecimiento urbano.

Las probabilidades de crecimiento urbano (Tabla 3) se las medirán según lo establecido por Jat et al. en el año 2017, en la cual establece que, el color verde claro representa un 10% de probabilidades de crecimiento urbano, y el color rojo representa un 100% de probabilidades de crecimiento urbano.

Tabla 3. Porcentajes de probabilidad de crecimiento urbano

	10%		50%		90%
	20%		60%		100%
	30%		70%		Presencia Urbana
	40%		80%		

Fuente: (Jat et al., 2017a).

El modelo generó cuatro tipos de reglas de comportamiento de autómata celular, como lo son: el crecimiento espontaneo o aleatorio, que representa la resistencia a la pendiente o coeficiente de difusión, el crecimiento por reproducción de nuevos centros, que representa a la pendiente o coeficiente de reproducción, el crecimiento orgánico o propagación, que representa a la resistencia a la pendiente o coeficiente de propagación, y el crecimiento influenciado por las vías de comunicación, que representa a la influencia del transporte (Clarke, 2018).

Comparación escenarios generados

Se analizó y comparó los mapas de áreas urbanizadas de la ciudad Buena Fe según las medidas estadísticas generadas por el modelo (Tabla 4), tanto para el escenario que se asumió el mantenimiento de las tendencias actuales de crecimiento poblacional con áreas restringidas y el caso de eliminación de estas áreas de limitación de crecimiento urbano (Li et al., 2021).

Tabla 4. Medidas estadísticas de crecimiento urbano

Medidas Estadísticas	Definición de abreviaturas
sng	Número acumulado de píxeles urbanizados por crecimiento espontáneo del vecindario.
og	Número acumulado de píxeles urbanizados por crecimiento orgánico.
rt	Número acumulado de píxeles urbanizados por carretera influyó en el crecimiento.
area	Número total de píxeles urbanos.
edges	Número de bordes de píxeles urbanos a no urbanos.
clusters	Número de grupos de píxeles urbanos.
rad	Radio de agrupación que encierra el área urbana.
diffusion	Coefficiente de difusión.
spread	Coefficiente de propagación.
breed	Coefficiente de raza.
Road gravity	Coefficiente de gravedad de la carretera.
Percent urban	Porcentaje de píxeles urbanizados dividido por la cantidad de píxeles disponibles para urbanización.
Growth rate	Tasa de crecimiento urbano.
Growth pixels	Número de píxeles de crecimiento cada año.

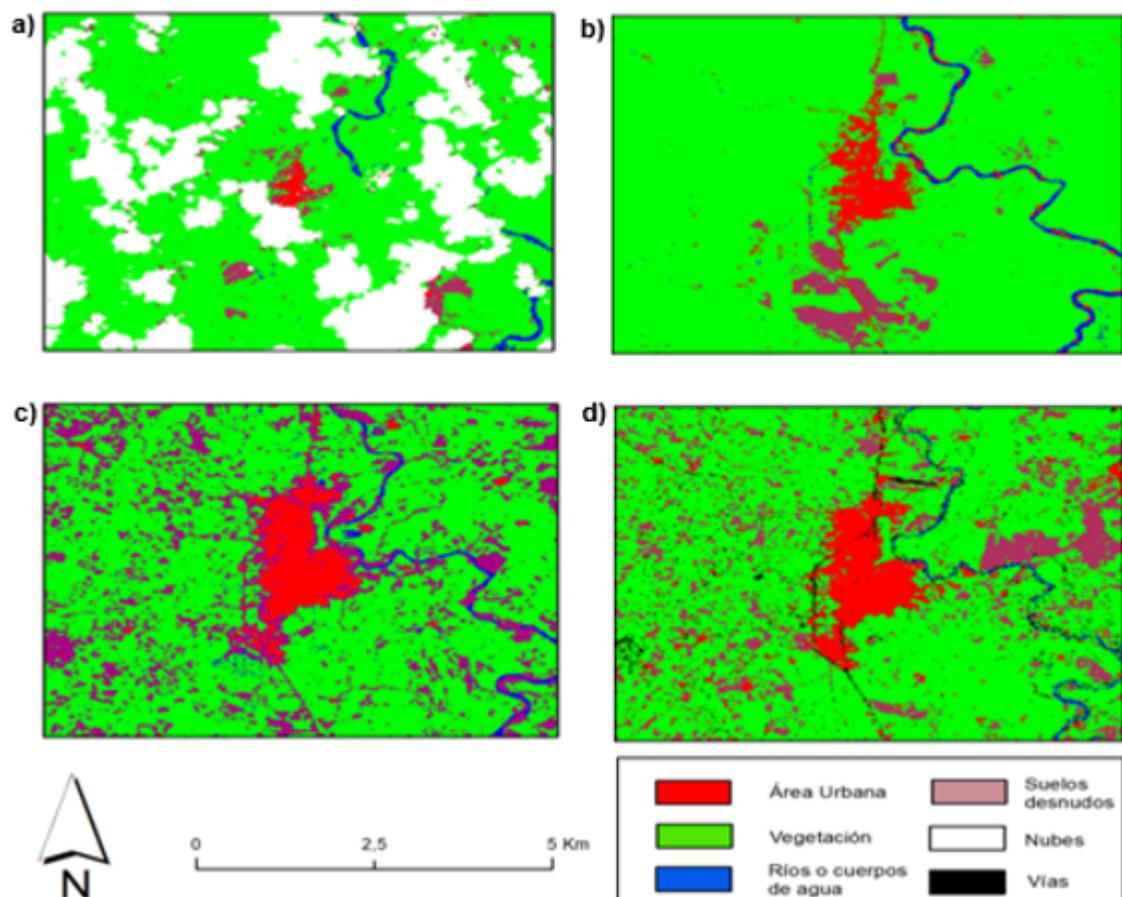
Fuente: (Jat et al., 2017a).

Resultados

Calibración del Modelo

Previo a calibración del modelo SLEUTH, se procesaron 4 imágenes satelitales con el método de clasificación supervisadas de diferentes momentos en el tiempo (Figura 2), las cuales se pudieron obtener regiones de interés de: área urbana, vegetación, ríos o cuerpos de agua, suelos desnudos, vías y nubes para el caso del año 1986. Todo esto se lo realizó con el software geoespacial Envi 4.7. El valor de índice kappa para la imagen a) perteneciente a el año 1986 fue de 0,86, para la imagen b) perteneciente al año 2000 fue de 0,76, y para la imagen c) y d) pertenecientes a los años 2013 y 2019 respectivamente fue de 0,84. Todos los valores tienen una fuerza de concordancia entre buena y muy buena.

Figura 2. Clasificación supervisada



La extracción de las áreas urbanas arrojó un valor de 20,24 km² ocupada por asentamientos urbanos en la ciudad Buena Fe para el año 1986, para el año 2000 un valor de 41,34 km², para el 2013 un valor de 54,15 km², y para el año 2019 un valor de 71,59 km². Para la capa de pendiente (Figura 3), se registraron valores de entre 0 y 30 grados de inclinación, con elevaciones de entre 47 a 124 m.s.n.m. Mientras que, para la red vial (Figura 3), se registraron vías no pavimentadas con 2 o más vías y autopistas para el año 1986, vías primarias, secundarias, terciarias y autopista para el

año 2013, y vías primarias, secundarias, terciarias, autopista y vías de servicios para el año 2019.



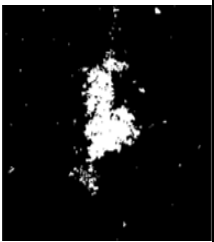

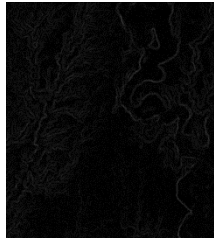
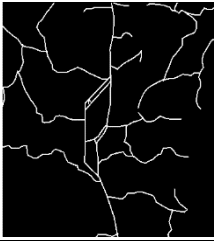

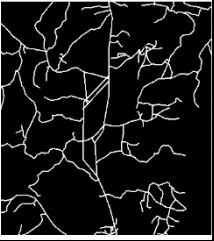


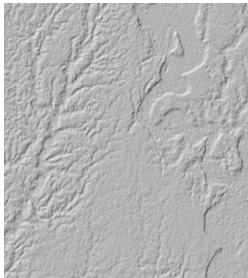
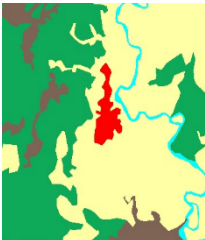
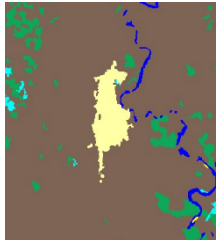
ÁREA URBANA				PENDIENTE
1986	2000	2013	2019	
				
RED VÍAL			ÁREAS EXCLUIDAS	
1986	2013	2019	SIN RESTRICCIÓN	CON RESTRICCIÓN
				
HILLSHADE		USOS DEL SUELO		
		1982	2015	
				

Figura 3. Datos de entrada del modelo SLEUTH en formato .gif

Para el proceso de calibración se realizó una fase de prueba del modelo SLEUTH, en la cual se ejecutó sin ningún problema, dando a entender, que el modelo cumple con las indicaciones preliminares y que está listo para la fase de calibración. Este proceso constó de 3 fases: fase gruesa, fase fina, y fase final, la cual nos arrojó coeficientes de mejor ajuste de (1, 1, 85,80, 26); estos valores se utilizaron para la validación y predicción. Los valores de propagación de pixeles urbanos, pendiente y gravedad de la carretera mostraron los valores más altos, demostrando que estos tuvieron mayores impactos en el crecimiento urbano entre 1986 y 2019.

Tabla 5. Resultados de calibración y coeficientes para la fase predictiva

	GRUESA			FINA			FINAL		
	STAR T	STE P	STO P	STAR T	STE P	STO P	STAR T	STE P	STO P
Calibración Difusión	0	25	100	1	1	1	1	1	1
Calibración Reproducción	0	25	100	1	1	1	1	1	1
Calibración Propagación	0	25	100	75	5	100	85	1	85
Calibración Pendiente	0	25	100	75	5	100	80	1	80
Calibración Vías	0	25	100	1	25	100	26	1	26
COEFICIENTES PARA LA FASE PREDICTIVA									
Difusión	Reproducción		Propagación		Pendiente		Gravedad de la carretera		
1	1		85		80		26		

Previo a la fase predictiva, se realizó una prueba de validación, para constatar que los datos generados en la tabla 5 (valores de coeficiente para la fase predictiva) se asemejen lo máximo posible a los datos observados.

Validación de modelo

El crecimiento urbano simulado para el año 2019, con 2013 como año semilla, se comparó con la extensión urbana observada en el año 2019 (Figura 4); demostrando una fuerte similitud entre la extensión modelada y observada. Los pixeles sobreestimados representan las áreas no urbanas en los datos históricos que se simularon como urbanas, mientras que, los pixeles subestimados, representan las áreas urbanas en los datos históricos que se simularon como no urbanas.

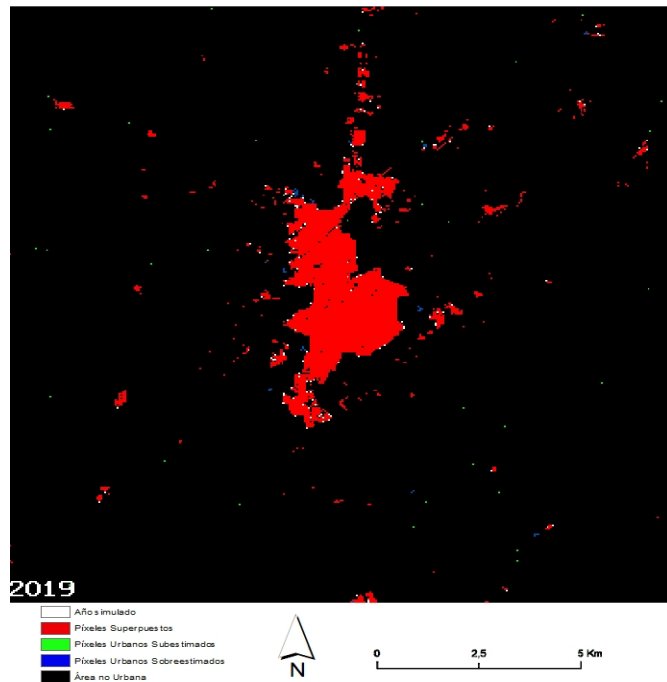


Figura 4. Comparación de la extensión urbana simulada y observada en 2019

Demostrando en la tabla 6 que 119198 píxeles de suelo no urbano y 7160 píxeles de suelo urbano se predijeron correctamente. La precisión de la predicción basada en el método de comparación celda por celda fue de 92.52%, con un coeficiente Kappa de 0.84.

Tabla 6. Matriz de error para la extensión urbana histórica y simulada para el año 2019

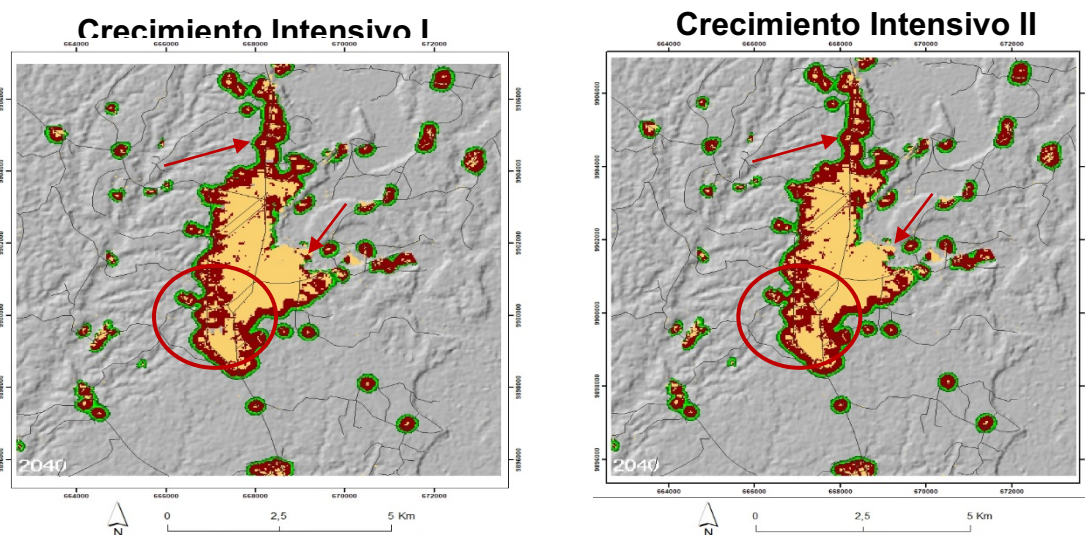
		Histórico en 2019		
		No urbano	Urbano	Suma
Simulado 2019	No urbano	119198	666	119864
	Urbano	2576	7160	9736
	Suma	121774	7826	129600
Coeficiente Kappa	0.84			

Predicción del modelo

Para la proyección hacia el año 2040 del área urbana de la ciudad Buena Fe con crecimiento intensivo I y crecimiento intensivo II, se tomó el año 1986 como año semilla y con 200 iteraciones Monte Carlo, considerando las áreas restringidas para el primer caso y sin considerar las áreas restringidas para el segundo caso.

Como se demuestra en la figura 5, en ambos casos de crecimiento urbano mostraron que, presentan un alto grado de probabilidad de crecimiento urbano en las periferias y en las células que rodean la ciudad Buena Fe, esto según la tabla 6 a excepción del lado este de la ciudad, donde no se genera ningún porcentaje de probabilidad de

crecimiento urbano; se presume que se debe al alto grado de pendiente que ahí se encuentra. La diferencia que sí se puede denotar ante la inexistencia restricciones de crecimientos urbano para el segundo tipo de crecimiento, existe un alto grado de presencia urbana en esas áreas.



En la tabla 7 podemos observar las comparaciones de las medidas estadísticas del **Figura 5.** Crecimiento urbano intensivo I y II, del área de estudio hacia el año 2040

crecimiento intensivo I y II, en donde, a las medidas estadísticas del crecimiento intensivo I, el número acumulado de píxeles urbanos por crecimiento espontáneo ('sng') aumentará de 1,56 en el año 2019 a 2,22 en el año 2040, lo que indica un aumento de asentamientos urbanos en áreas no urbanizadas, de manera similar, los píxeles de crecimiento orgánico acumulados ('og') indican un desarrollo relativamente mayor en los asentamientos urbanos ya existentes de las localidades circundantes en el año 2040.

La tasa de crecimiento influenciado por las carreteras ("rt") es de 1,35 en el año 2019 a 1,91 en el año 2040, lo que indica que el crecimiento aumentará a lo largo de la carretera, principalmente en la zona norte, noreste y este de la ciudad. Se estima que el área urbana dentro del área de estudio establecida de la ciudad Buena Fe aumente de 71,59 km² en el año 2019 a 221,16 km² en el año 2040.

Los bordes urbanos, que nos indica la tasa de crecimiento dispersos o representación de píxeles de áreas urbanas con otras clases de uso de suelo, muestran un aumento de 1706 píxeles en el año 2019 a 3,93 píxeles el año 2040. Se muestra un considerado aumento de los conglomerados en el área urbana ("rad") de 47,74 km en el área urbana a 83,90 km en el año 2040, indicando la existente expansión urbana del área de estudio. La expansión hacia el exterior del crecimiento urbano ("difusión") ("spread") aumentaran ligeramente, esto se puede atribuir, al aumento de asentamientos urbanos en las localidades existentes ('og'). Sin embargo, la tasa de

crecimiento urbano está disminuyendo en el año 2040 en comparación con el año 2019, esto puede atribuirse a un posible crecimiento vertical de las áreas urbanizadas. En cuanto a las medidas estadísticas del crecimiento intensivo II, el número acumulado de píxeles urbanos por crecimiento espontáneo (“sng”) aumenta de 1,56 en el año 2019 a 2,29 en el año 2040, lo que indica un aumento de asentamientos urbanos en áreas no urbanizadas. De manera similar, los píxeles de crecimiento orgánico acumulados (“og”) indican un desarrollo relativamente mayor en los asentamientos urbanos ya existentes de las localidades circundantes en el año 2040. La tasa de crecimiento influenciado por las carreteras (“rt”) es de 1,35 en el año 2019 a 1,88 en el año 2040, lo que indica que el crecimiento aumentará a lo largo de la carretera, principalmente en la zona norte, noreste y este de la ciudad. Se estima que el área urbana dentro del área de estudio establecida de la ciudad Buena Fe aumente de 71,59 km² en el año 2019 a 221,87 km² en el año 2040.

Los bordes urbanos, que indica la tasa de crecimiento dispersos o representación de píxeles de áreas urbanas con otras clases de uso de suelo, muestran un aumento de 1706 en el año 2019 a 3829 en el año 2040. Se muestra un considerado aumento de los conglomerados en el área urbana (“rad”) de 47,74 en el área urbana a 84,04 en el año 2040, indicando la existente expansión urbana del área de estudio.

La expansión hacia el exterior del crecimiento urbano (“difusión”) (“spread”) aumentarán ligeramente; esto se puede atribuir al aumento de asentamientos urbanos en las localidades existentes (“og”). Sin embargo, la tasa de crecimiento urbano está disminuyendo en el año 2040 en comparación con el año 2019, esto puede atribuirse a un posible crecimiento vertical de las áreas urbanizadas.

Tabla 7. Comparación de medidas estadísticas de crecimiento intensivo I y II

Medidas Estadísticas	Definición abreviaturas	de 2019	Crecimiento Intensivo I 2040	Crecimiento Intensivo II 2040
sng	Número acumulado de píxeles urbanizados crecimiento espontáneo del vecindario.	1.56	2.22	2.29
og	Número acumulado de píxeles urbanizados crecimiento orgánico.	361.76	866.99	867.74
rt	Número acumulado de píxeles urbanizados por carretera influyó en el crecimiento.	1.35	1.91	1.88
area	Número total de píxeles urbanos.	7159.62	22116.78	22187.58
edges	Número de bordes de píxeles urbanos a no urbanos.	1706.60	3934.65	3829.91
clusters	Número de grupos de píxeles urbanos.	170.60	346.12	346.93
rad	Radio de agrupación que encierra el área urbana.	47.74	83.90	84.04
diffusion	Coefficiente de difusión.	1.05	1.22	1.22
spread	Coefficiente de propagación.	89.34	100.00	100.00
breed	Coefficiente de raza.	1.05	1.22	1.22
Road gravity	Coefficiente de gravedad de la carretera.	26.67	30.09	30.09

Percent urban	Porcentaje de píxeles urbanizados dividido por la cantidad de píxeles disponibles para urbanización.	14.34	27.22	27.20
Growth rate	Tasa de crecimiento urbano.	5.09	3.94	3.93
Growth pixels	Número de píxeles de crecimiento cada año.	364.73	871.19	871.95

Comparación de escenarios generados

En la figura 6 encontramos las comparaciones de las tendencias más importantes en el crecimiento urbano, el valor del área urbana dentro del área de estudio figura a), demostró un aumento en ambos escenarios proyectados, pero con ligeras diferencias numéricas, para el Crecimiento Intensivo I, se demostró que, de 71,59 km² para el año 2019 aumentó a 221,16 km² para el año 2040, mientras que, para el Crecimiento Intensivo II, registró un valor de 221,87 km², esto se puede atribuir a que las áreas restringidas no influyen en gran parte al crecimiento del área urbana en el área de estudio. De igual manera, para el número de píxeles de crecimiento en cada año en la figura b), se demostró que, para el año 2019 registraba un valor de 364 píxeles, para el Crecimiento Intensivo I se obtuvo un valor de 871 píxeles por

año, mientras que, para el Crecimiento Intensivo II se registró un valor de 871. Sin embargo, en la figura c), se demostró una disminución en la tasa de crecimiento urbano para ambos escenarios, en el año 2019 se registró un valor de 5,09% de promedio anual. Para el Crecimiento Intensivo I se obtuvo un valor de 3,94% de promedio anual, mientras que, para el Crecimiento Intensivo II se obtuvo un valor de 3,93% de promedio anual. No existieron diferencia significativa entre ambos escenarios y el decrecimiento de la tasa de crecimiento anual puede atribuirse a un posible crecimiento vertical de las áreas urbanizadas. En cuanto a las áreas restringidas, no representan diferencias significativas para la limitación del crecimiento de las áreas urbanas de la ciudad Buena Fe

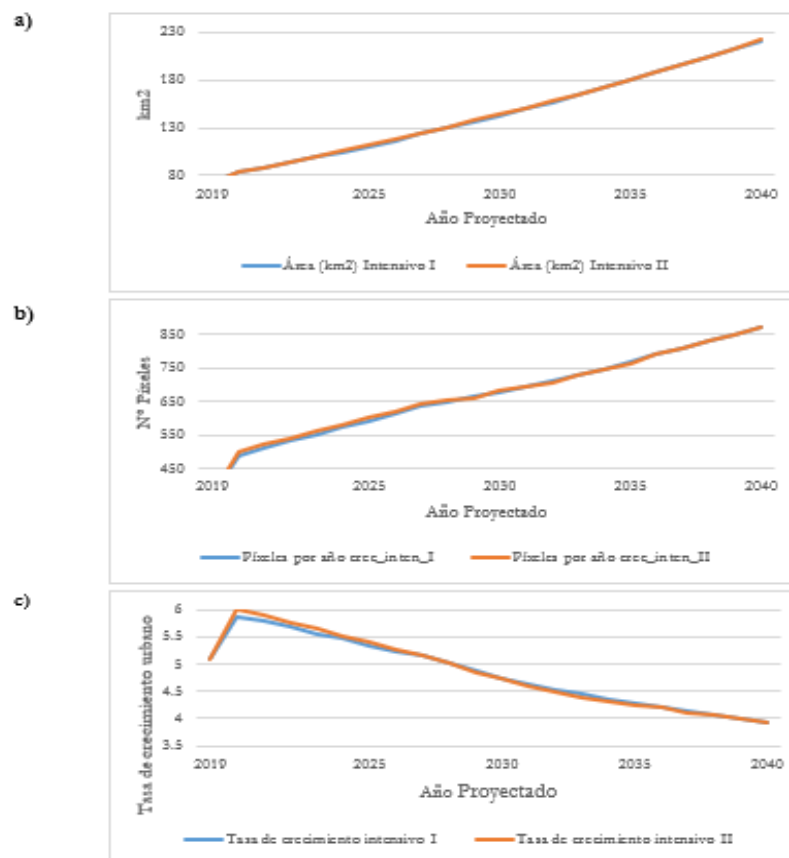


Figura 6. Comparación en a) área urbana dentro del área de estudio, b) número píxeles por año, c) tasa de crecimiento urbano durante 2019–2040, en los dos escenarios en el área de estudio.

DISCUSIÓN

La ciudad Buena Fe ha sido objeto de múltiples investigaciones por parte de estudiantes e investigadores, pero en cuanto a proyectos de proyecciones urbanas son escasas o nulas. Por tal razón, esta ciudad se convirtió en un importante foco de este estudio. Los resultados demostraron que el crecimiento urbano se está produciendo, y en mayor significancia en la parte norte y noreste, influenciadas por las carreteras en ambos casos de crecimiento intensivo I y II.

Se observa que la tasa de crecimiento poblacional en termino de cobertura del suelo, para el año 2040 disminuirá a comparación del año 2019, las principales razones pueden ser que se produzca un crecimiento vertical (viviendas de varios pisos) y no horizontal (viviendas dispersas); esto se puede corroborar con los resultados obtenidos en el crecimiento orgánico y crecimiento espontaneo de células urbanizadas.

Según resultados obtenidos en investigaciones realizadas en áreas con similares características geográficas, como lo es la ciudad de Tandil, Argentina, con una superficie urbana de 52,34 km², y otra ciudad con menor superficie urbana como la de la Ciudad de Praia, Cabo Verde, con 33,2 km², se denotó que existe una misma dinámica de desarrollo urbano, presentando un crecimiento compactado en el área central, un fuerte crecimiento en las periferias de la ciudad y un alto crecimiento urbano por influencia de carreteras (Goncalves et al., 2019; Linares & Picone, 2018). A diferencia de ciudades más extensas, donde se presenta mayor presencia de células urbanas en áreas naturales (Jat et al., 2017b; Li et al., 2021).

SLEUTH es capaz de manejar la restricción del uso de la tierra a lo largo recintos militares, áreas verdes, áreas protegidas, reservas naturales y centros educativos, en la simulación del crecimiento. Al manipular las capas de datos de entrada, las reglas de auto modificación y los coeficientes de control de crecimiento, SLEUTH se puede utilizar para generar diferentes escenarios de planificación del uso del suelo. Además, según lo plantean diversos investigadores (Du, 2016; Jat et al., 2017b; Li et al., 2021; Liu & Sun, 2020), los resultados que generan estos modelos de autómatas celulares serían útiles para la planificación urbana, la planificación de políticas de uso del suelo, la presupuestación de recursos y la asignación de recursos para las áreas urbanas.

Se constató que el rendimiento del modelo SLEUTH es satisfactorio para simular el crecimiento urbano de la ciudad Buena Fe. No obstante, subestima el crecimiento urbano disperso en células urbanizadas de menor tamaño, esto se puede deber a la resolución aproximada de los datos de entrada en la fase de calibración. Al mismo tiempo, en la fase de calibración, a mayor resolución, mayor tiempo cálculo y operación, tan solo en fase de calibración se necesitó 8 horas de cálculo y tiempo computacional. Se encontró problemas similares en un estudio realizado con el mismo modelo de autómatas celulares (Jat et al., 2017a). La predicción del desarrollo urbano es un desafío debido a la dinámica del proceso de edificación.

Al lograr la fase de prueba del modelo SLEUTH, nos verifica que las condiciones iniciales y el conjunto de datos están completos y cumplen las condiciones deseadas. Según se manifiesta en otras investigaciones, es muy importante ejecutar la fase de prueba antes de calibrar el modelo, de lo contrario, será una pérdida de tiempo si las condiciones iniciales o los datos de entrada no satisfacen las condiciones deseadas

(Jat et al., 2017a). Al presentar dificultades en la lectura de los datos en la fase de prueba, se emplearon recomendaciones establecidas en diferentes estudios para el procesamiento de las imágenes, como el exportar a formato .grid antes que al formato .gif, y que en el formato .gif es necesario utilizar 8 bits renderizados (Du, 2016).

El modelo SLEUTH se ha probado ampliamente en países desarrollados, pero se han realizado muy pocos estudios en países en desarrollo donde el tamaño de la unidad de vivienda es muy pequeño y fragmentado, Además, los diferentes tipos de desarrollo urbano en los países en desarrollo que tienen diferentes características socioeconómicas, culturales y de comportamiento humano inciden en el modelado de crecimiento urbano (Kantakumar et al., 2011). Por lo tanto, la simulación del crecimiento urbano sigue siendo un gran desafío, especialmente para las áreas urbanas heterogéneas.

Para optimizar el tiempo planeado de obtención de los resultados, se recomienda verificar que exista información de los años que se van a ser tratados, debido que en la presente investigación no existía información alguna sobre las vías del año 1986, por lo cual se procedió a la digitalización de las vías de la ciudad Buena Fe de una carta topográfica compilada en el año 1984. De manera similar, las imágenes satelitales landsat-7 en ciertos periodos de tiempos presentan problemas de bandeo, por lo cual existe una ausencia de información.

Para obtener resultados más confiables, se recomienda utilizar una mayor cantidad de datos de entrada, sin embargo, los resultados solo sirven para planificar, más no para ser utilizado como una verdad absoluta. El utilizar varios modelos de simulación urbana en un área definida ayudará a corroborar los resultados obtenidos y poder entender de mejor manera las posibles tendencias socios ambientales.

Conclusiones

La calibración a este nivel de detalle espacial sigue siendo un proceso computacionalmente intensivo, que requiere un amplio uso de entorno informático, y esto puede impedir el uso del modelo por parte de gobiernos locales. Sin embargo, esto va a depender de la sensibilidad del modelo al tamaño de celda y a los conjuntos de datos históricos utilizados para la calibración.

Las proyecciones demostraron un crecimiento del área urbana de la ciudad Buena Fe, dando como resultado un patrón típico de áreas poco desarrolladas, en donde es predominante un crecimiento centrado y de borde, es decir, que representan un crecimiento en centros urbanos existentes y en la periferia de la ciudad, además de denotarse un crecimiento influenciado por las carreteras. También se puso en manifiesto la influencia de la topografía, que impide el crecimiento en áreas más empinadas.

Los patrones tanto temporales y espaciales del crecimiento urbano futuro para la ciudad Buena Fe hacia el año 2040 fueron simulados bajo dos escenarios diferentes. Se denotaron los mismos tipos de crecimiento, por lo cual no hubo diferencias estadísticas en los resultados, además de que se pudo denotar la alta influencia de la topografía y áreas no urbanizables, demostrando esto un alto cumplimiento de no urbanización de las áreas restringidas.

Realizar simulaciones y proyección del crecimiento urbano no es una tarea fácil, dado el alto grado de incertidumbre y la variedad de factores impulsores que intervienen en el comportamiento de estas dinámicas. En países en vías de desarrollo como Ecuador, la evaluación y modelado del crecimiento urbano son escasos y esto conduce a un crecimiento urbano desigual y no planificado.

Referencias

- Barros-Bastidas, C., & Turpo, O. (2020). La formación en investigación y su incidencia en la producción científica del profesorado de educación de una universidad pública de Ecuador. *Publicaciones*, 50(2), 167–185. doi:10.30827/publicaciones.v50i2.13952
- Barros, C., & Turpo, O. (2017). La formación en el desarrollo del docente investigador: una revisión sistemática. *Revista Espacios*, 38(45).
- Clarke, K. C. (2018). A Short Presentation of SLEUTH (pp. 521–525). https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_39
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2007). Optimal Calibration of SLEUTH C Dietzel and K C Clarke Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model. In *Transactions in GIS (Vol. 11, Issue 1)*.
- Du, R. (2016). Urban growth: Changes, management, and problems in large cities of Southeast China. *Frontiers of Architectural Research*, 5(3), 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.04.002>
- Goncalves, T. M., Zhong, X., Ziggah, Y. Y., & Dwamena, B. Y. (2019). Simulating Urban Growth Using Cellular Automata Approach (SLEUTH)-A Case Study of Praia City, Cabo Verde. *IEEE Access*, 7, 156430–156442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949689>
- Jat, M. K., Choudhary, M., & Saxena, A. (2017a). Application of geo-spatial techniques and cellular automata for modelling urban growth of a heterogeneous urban fringe. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.02.002>
- Jat, M. K., Choudhary, M., & Saxena, A. (2017b). Application of geo-spatial techniques and cellular automata for modelling urban growth of a heterogeneous urban fringe. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.02.002>
- Kantakumar, L., Sawant, N. G., & Kumar, S. (2011). Forecasting urban growth based on GIS, RS and SLEUTH model in Pune metropolitan area. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES (Vol. 2, Issue 2)*. <https://www.researchgate.net/publication/284545656>
- León, Fernanda. (2016). Aplicación de imágenes satelitales en procesos físicos-urbanos. Caso de estudio: Crecimiento Urbanístico de Quito (Ecuador) año 1991 a 2000. *Revista Geociencias & Geodatos*.
- Li, N., Miao, S., & Wang, Y. (2021). The future urban growth under policies and its ecological effect in the Jing-Jin-Ji area, China. *Heliyon*, 7(4), e06786. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06786>
- Linares & Picone, M. (2018). Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina. 6(1), 5–25. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/87402/CONICET_Digital_Nro.70bc7a91-1818-4e9a-a375-f30973c39121_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Liu, F., & Sun, W. (2020). Impact of active “organic decentralization population” policy on future urban built-up areas: Beijing case study. In *Habitat International (Vol.*

-
- 105). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102262>
- Márquez, B. (2008). Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano utilizando Sistemas de Información Geográficos: Ciudad Juárez, Chihuahua. 49(1), 11. <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/2006719/>
- MIDUVI. (2015). Informe Nacional del Ecuador para la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible HABITAT III. Subsecretaría de Hábitat y Asentamientos Humanos, 110. http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/05/Informe-Pais-Ecuador-Enero-2016_vf.pdf
- PDyOT BUENA FE. (2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial del Cantón San Jacinto de Buena Fe. 17. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1260001890001_PDyOT Buena Fe_2015-2019_14-11-2014.pdf
- Torrens, P. M. (2011). Calibrating and Validating Cellular Automata Models of Urbanization. *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*, 335–345. <https://doi.org/10.1002/9780470979563.ch23>
- von Feigenblatt, Otto Federico (2007). *Japan and Human Security: 21st Century ODA Policy Apologetics and Discursive Co-optation* (2nd ed.). Delray Beach: Academic Research International.
- von Feigenblatt, Otto Federico (2009a). Anomie, Racial Wage, and Critical Aesthetics: Understanding the Negative Externalities of Japanese and Thai Social Practices. *Journal of Asia Pacific Studies*, 1(1), 69-75.
- Xu, Q., Yang, R., Dong, Y. X., Liu, Y. X., & Qiu, L. R. (2016). The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China. *Ecological Indicators*, 70, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.052>